

13. Квартенко, А. Н. Роль закрепленной микрофлоры при очистке подземных вод сложного физико-химического состава [Текст] / А. Н. Квартенко // Коммунальное хозяйство городов». Научно-технический сборник. – 2010. – Вып. 93. – С. 115–120.
14. Кравченко, О. В. Роль мікроорганізмів при видаленні із води високих концентрацій заліза на фільтрах з цеолітовим завантаженням [Текст] / О. В. Кравченко // Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення. Збірник наукових праць. – 2015. – С. 102–103.

Досліджено десорбцію NOX в системі HNO₃–H₂O–NOX. Розраховано парціальний тиск компонентів NOX, їх вміст у рідкій фазі (HNO₃ 58–60 % мас.). Побудована залежність парціального тиску NO₂, N₂O₄, їх вмісту в рідкій фазі при різних концентраціях HNO₃, температурах. Обчислена розчинність NOX у рідкій фазі при температурах 40–70 °C

Ключові слова: оксиди азоту, нітратна кислота, десорбція, парціальний тиск, розчинність, коефіцієнт Генрі

Исследована десорбция NOX в системе HNO₃–H₂O–NOX. Рассчитано парциальное давление компонентов NOX, их содержание в жидкой фазе (HNO₃ 58–60 % масс.). Построена зависимость парциального давления NO₂, N₂O₄, их содержания в жидкой фазе при различных концентрациях HNO₃, температурах. Определена растворимость NOX в жидкой фазе при температурах 40–70 °C

Ключевые слова: оксиды азота, азотная кислота, десорбция, парциальное давление, растворимость, коэффициент Генри

УДК 661.8'022:661.566

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50293

ДЕСОРБЦИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ИЗ ПРОДУКЦИОННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ (58–60 % МАСС.)

А. А. Литвиненко

Ассистент*

E-mail: olexandr.lytvynenko@gmail.com

Т. И. Печенко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: pechenko.t.i@gmail.com

М. А. Подустов

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: podustov@kpi.kharkov.ua

А. И. Букатенко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: bukatenko.o.i@ukr.net

*Кафедра автоматизации химико-технологических систем и экологического мониторинга
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61000

1. Введение

Азотная кислота по масштабу производства занимает второе место среди различных кислот после серной. Большой масштаб производства азотной кислоты объясняется тем, что азотная кислота и ее соли приобрели в экономике весьма существенное значение. Главнейшими потребителями продуктов азотнокислотной промышленности являются сельское хозяйство и промышленность взрывчатых веществ. В сельском хозяйстве для удобрения почв используют соли азотной кислоты, а в промышленности взрывчатых веществ в качестве основных исходных материалов применяют как соли, так и непосредственно азотную кислоту [1].

В настоящее время в Украине используются около 30 млн га пахотной земли для выращивания различных сельскохозяйственных культур [2].

Известно, что на урожай сельскохозяйственных культур среди прочих факторов влияет наличие в почве соединений азота. Количество азота, уносимого ежегодно с 1 га почвы урожаем различных растений,

составляет от 30 до 50 кг. Лишь небольшая часть этого азота вновь возвращается в почву. Вследствие вымывания солей из почвы и процесса денитрификации, связанного с образованием элементарного азота, почва непрерывно теряет соединения азота [1, 3].

Азот является составной частью белков, играющих большую роль в жизни растений и животных. Без азота растения не могут синтезировать белковые вещества. Для повышения урожайности требуется систематическое внесение в почву высококонцентрированных азотсодержащих минеральных удобрений.

В настоящее время для производства всех азотно-кислотных солей, применяемых в качестве удобрений, исходным веществом является азотная кислота.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Процессы, протекающие при производстве азотной кислоты, описываются следующими основными реакциями:



В соответствии с диффузионной теорией [4], гетерогенные процессы (1) и (2) протекают следующим образом. Нитрозный газ, содержащий оксиды азота NO_2 и N_2O_4 , диффундирует из газовой фазы в жидкую через поверхность раздела фаз, представляющую собой пленку в барботажных абсорбционных колоннах. Растворенные в жидкой фазе оксиды азота NO_2 и N_2O_4 вступают в реакцию с водой с образованием, в конечном счете, азотной кислоты и оксида азота NO . Оксид азота NO , составляющий 1/3 объема NO_2 , диффундирует из жидкой фазы в газовую.

В современных схемах производства образующаяся азотная кислота 58–60 % масс содержит растворенные оксиды азота. Для возможности дальнейшего использования азотная кислота должна быть очищена от примесей, в том числе от оксидов азота. По этой причине после абсорбции азотная кислота направляется на отдувку. В процессе отдувки (десорбции) растворенные в азотной кислоте оксиды азота удаляются путем продувки всего объема кислоты добавочным воздухом в продувочной колонне. Чистая азотная кислота из продувочной колонны подается на склад, а отдутые оксиды азота возвращаются на стадию абсорбции.

Следует отметить, что в литературе по процессам, протекающим при производстве азотной кислоты из оксидов азота и по равновесию этих процессов, данные противоречивы и недостаточно точны. Также отсутствуют сведения о количестве растворенных оксидов азота в кислоте, не приводится, на какую кислоту рассчитаны полученные результаты научных экспериментов (общую, отдутую, отбеленную).

Авторы [5, 6] исследовали щелочные растворы и растворимость оксидов азота в них; в работе [7] описаны опыты с растворами щелочи, перекиси водорода, также отмечена большая роль азотистой кислоты.

Исследования [8] включают в себя опыты со специальной насадкой, которая изменяет гидродинамические условия в абсорбционной колонне для улучшения процесса абсорбции оксидов азота водными растворами HNO_3 .

У исследователей [9] при проведении опытов диапазон изменения концентрации азотной кислоты (60–65 % масс) несколько завышен по отношению к получаемой продукционной кислоте (58–60 % масс).

В исследованиях авторов [10] концентрация оксидов азота была несколько завышена (около 5 % об против 3 % об в данном исследовании). У авторов [11] напротив, концентрация оксидов азота была низкой – ниже 0,0784 % об.

Учеными [12, 13] было изучено равновесие оксидов азота с растворами азотной кислоты при кислотообразовании в зависимости от температуры.

Автор [14] изучает абсорбцию лишь диоксида азота водными растворами.

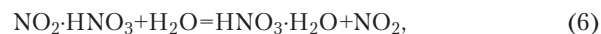
Коллектив исследователей [15] представил свою модель процессов абсорбции NO_2 (N_2O_4) и окисления HNO_3 вблизи границы раздела фаз. Группа ученых [16] изучала равновесие при образовании азотной кислоты только лишь в газовой фазе.

Автор [17] исследовал обширную систему, включающую в себя азот, его оксиды (NO , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_3) и растворы кислот (HNO_2 и HNO_3).

Разброс результатов разных авторов можно объяснить различными представлениями процессов взаимодействия компонентов в системе оксиды азота – азотная кислота – вода и недостаточной точностью замера парциального давления (или концентрации) оксидов азота при низком содержании их в газовой фазе.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований показывает, что в системе оксиды азота – азотная кислота – вода могут протекать следующие реакции: сольватации, диссоциации, гидратации, ионизации и др. [1, 3, 18–20].

При содержании азотной кислоты в растворе около 62 % масс., растворенных оксидов азота около 2 % масс и температуре 40–70 °С преобладающее влияние на систему оксиды азота – азотная кислота – вода могут оказывать реакции гидратации азотной кислоты и диссоциации N_2O_4 , которые могут быть представлены в следующем виде:



При анализе имеющихся данных о диссоциации N_2O_4 в различных растворителях [6, 10, 12], установлено, что характер диссоциации слабо зависит от структуры растворителя и определяется в основном концентрацией N_2O_4 в растворе. Оксиды азота в жидкой фазе находятся главным образом в виде N_2O_4 и только в области малых концентраций степень диссоциации достигает 40–50 %. По данным авторов [13], константа равновесия реакции диссоциации N_2O_4 зависит только от температуры и может быть представлена в следующем виде:

$$\lg K = -\frac{3445}{T} + 7,797. \quad (8)$$

Данную зависимость используем для вычисления равновесия в жидкой фазе.

Равновесие в газовой фазе определяем по формуле Боденштейна, которую можно найти в обширной литературе, например [20, 21]:

$$\begin{aligned} \lg K &= \lg \frac{P_{\text{NO}}^2 P_{\text{O}_2}}{P_{\text{NO}_2}^2} = \\ &= \left(-\frac{5749}{T} + 1,75 \lg T - 0,0005T + 1,8306 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Известно, что закон Генри достаточно точно описывает фазовое равновесие лишь при низких концентрациях газа. Авторы [9, 17] отметили, что закон Генри

не соблюдается при содержании N_2O_4 в жидкой фазе свыше 2,5 % масс.

По данным [18], в отечественных промышленных абсорбционных колоннах образуется азотная кислота 60–60,5 % масс HNO_3 , которая содержит до 2 % масс растворенных оксидов азота.

Данная азотная кислота проходит стадию отдувки оксидов азота в продувочной колонне, которая представляет собой цилиндр диаметром 2,2 м и высотой 10,7 м с четырьмя ситчатыми тарелками. Расстояние между тарелками составляет 0,6 м. В продувочной колонне азотную кислоту подают на верхнюю тарелку (концентрация азотной кислоты в этой точке 60–60,5 % масс, а суммарное содержание оксидов азота около 2 % масс), воздух подают под нижнюю тарелку (с температурой около 80 °С) [18]. Содержание оксидов азота в продукционной кислоте по техническим условиям [22] должно быть на уровне 0,07 % масс или ниже.

По результатам обследования абсорбционных отделений [23, 24] выявлено, что содержание растворенных форм оксидов азота в продукционной кислоте завышено по сравнению с проектными данными и составляет около 3 % масс. Сравнивая данные [18] и [23, 24] можно сделать вывод, что реальное содержание растворенных оксидов азота в азотной кислоте перед продувочной колонной является завышенным по сравнению с проектным значением. Следовательно, оксиды азота не удаляются до нормированного уровня в существующей продувочной колонне.

Коллектив авторов [25] занимался кинетикой превращений оксидов азота, другими словами поиском констант скорости реакций оксидов азота и озона. Предложены константы скорости реакций оксидов азота NO и NO_2 основанные на экспериментальных данных.

Исследователь [26] изучает абсорбцию и десорбцию оксидов азота низкой концентрации. Предлагается метод по расчету эффективности десорбции в зависимости от соотношения L/G , количества теоретических тарелок, соответствующих абсорбционно-десорбционной системе и других параметров процесса.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования процесса десорбции оксидов азота из растворов продукционной азотной кислоты является определение констант Генри для растворенных оксидов азота NO_2 и N_2O_4 .

Для достижения поставленной цели необходимо:

- исследовать зависимость парциального давления оксидов азота NO_2 и N_2O_4 от их концентраций в жидкой фазе при определенных значениях концентрации азотной кислоты и температуры;

- используя полученные зависимости, рассчитать параметры колонны для отдувки оксидов азота из продукционной неконцентрированной азотной кислоты (58–60 % масс.) до технологических норм.

4. Материалы и методы исследования десорбции оксидов азота из системы оксиды азота – азотная кислота – вода

4. 1. Схема экспериментальной установки для исследования десорбции оксидов азота из системы оксиды азота – азотная кислота – вода

Схема экспериментальной установки, которая использовалась для исследования десорбции оксидов азота из системы $NO_x-HNO_3-H_2O$, изображена на рис. 1.

Основным рабочим аппаратом установки является колонна (1), которая представляет собой цилиндр из нержавеющей стали 1X18H10T с внутренним диаметром 0,067 м и высотой 1,4 м. Принятый диаметр колонны позволяет воспроизводить полученные результаты в промышленных условиях.

Эксперимент в колонне начинался с подачи азотной кислоты на ситчатую тарелку. В напорной емкости, куда заливается азотная кислота заданной концентрации с равновесным количеством растворенных оксидов азота, создавалось давление на 0,15 МПа меньше рабочего давления в колонне. Потом открывались вентили напорной емкости и колонны, кислота через перелив на тарелке поступала в нижнюю часть колонны.

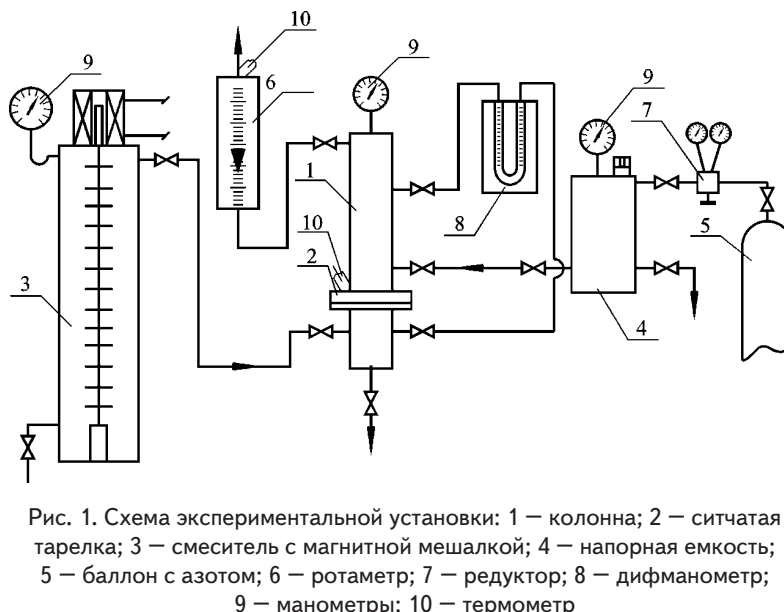


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – колонна; 2 – ситчатая тарелка; 3 – смеситель с магнитной мешалкой; 4 – напорная емкость; 5 – баллон с азотом; 6 – ротаметр; 7 – редуктор; 8 – дифманометр; 9 – манометры; 10 – термометр

Когда уровень азотной кислоты в колонне достигал определенной отметки, что фиксировалось с помощью нижнего обзорного окна, со смесителя вводился проанализированный на содержание оксидов азота нитрозный газ, потом устанавливался необходимый режим расхода газа, рабочего давления в колонне.

В процессе фиксировались температура на тарелке, отработанного газа, исходной и продукционной азотной кислоты. При отрегулированном режиме работы установки проводился отбор проб для анализа: газовой фазы в – эвакуированные колбы и жидкой фазы при условии, что уровень раствора азотной кислоты в колонне оставался неизменным.

Во время работы в колонне поддерживались постоянными температура, давление, состав и расход жид-

кости и газа настолько, насколько позволяли колебания в системе. После того, как устанавливался режим в колонне, фиксировалось чистое время эксперимента (15–20 мин), с учетом которого и объема полученной кислоты определялась плотность орошения в колонне, необходимая для сведения материального баланса по газу и кислоте.

4. 2. Методика определения недоокисленных форм растворенных соединений азота для исследования равновесия в системе оксиды азота – азотная кислота – вода

Жидкая фаза, которая содержит азотную кислоту и недоокисленную форму растворенных соединений азота, анализировалась перманганатометрическим методом, потом определялась общая кислотность раствора в пересчете на азотную кислоту [27].

5. Результаты экспериментальных исследований равновесия в системе оксиды азота – азотная кислота – вода

Данная работа посвящена исследованию десорбции оксидов азота малой концентрации от 0,05 % до 1,8 % из азотной кислоты.

При проведении экспериментальных исследований концентрацию азотной кислоты изменяли в диапазоне 58–60 % масс, температуру – 40–70 °С, суммарную концентрацию оксидов азота – 0,05–1,8 % об.

Данные условия проведения экспериментальных исследований отвечают условиям ведения технологических процессов в процессе получения азотной кислоты в действующих отечественных агрегатах.

Основные результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2, 3.

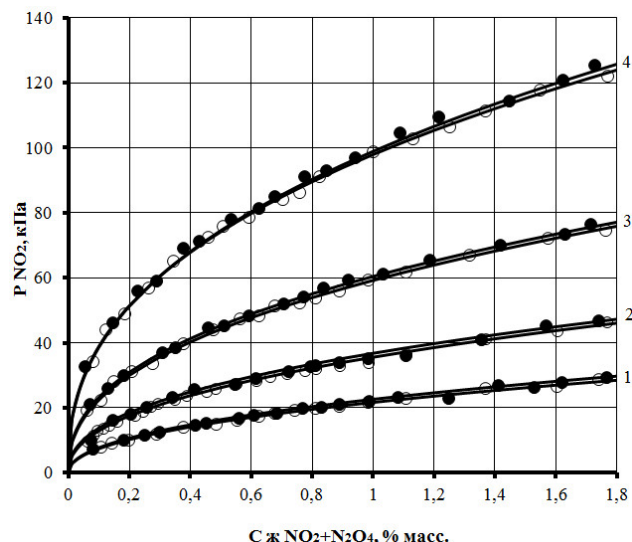


Рис. 2. Зависимость парциального давления NO_2 от суммарной концентрации оксидов азота NO_2 и N_2O_4 в жидкой фазе при концентрации HNO_3 (●) 58 и (○) 60 % масс, и температурах (1) – 40 °С, (2) – 50 °С, (3) – 60 °С, (4) – 70 °С

Из зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, следует, что при увеличении температуры и увеличении суммарной концентрации NO_2 и N_2O_4 парциальное

давление как NO_2 , так и N_2O_4 , над растворами азотной кислоты увеличивается. В диапазоне концентраций кислот от 58 до 60 % масс при одной температуре зависимость парциального давления от содержания NO_2 и N_2O_4 в жидкой фазе уменьшается незначительно. Температура в пределах от 40 до 70 °С оказывает решающее влияние – при неизменном содержании NO_2 и N_2O_4 в жидкой фазе парциальное давление как NO_2 , так и N_2O_4 увеличивается.

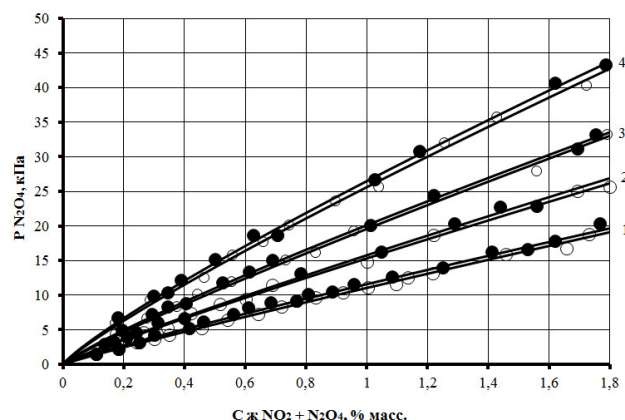


Рис. 3. Зависимость парциального давления N_2O_4 от суммарной концентрации оксидов азота NO_2 и N_2O_4 в жидкой фазе при концентрации HNO_3 (●) 58 и (○) 60 % масс, и температурах (1) – 40 °С, (2) – 50 °С, (3) – 60 °С, (4) – 70 °С

6. Обсуждение результатов экспериментальных исследований равновесия в системе оксиды азота – азотная кислота – вода

На рис. 2, 3 приведены зависимости парциальных давлений NO_2 и N_2O_4 от суммарной концентрации оксидов азота в жидкой фазе для разных температур и концентраций кислоты. Данные зависимости определены на основе проведенных опытов при различных концентрациях азотной кислоты и температурах. По данным зависимостям вычислены значения растворимости NO_2 и N_2O_4 согласно закону Генри. Использовалась следующая формулировка закона Генри: растворимость, или константа Генри, определяется как отношение парциального давления компонента газовой фазы к концентрации его в жидкой фазе.

При обработке экспериментальных данных в виде $\lg H = f(T)$ для различных концентраций получены следующие выражения коэффициентов Генри:

$$\lg H_{NO_2} = -\frac{483}{T} + 4,57, \quad (10)$$

$$\lg H_{N_2O_4} = -\frac{1673}{T} + 6,69. \quad (11)$$

На рис. 4, 5 представлены графические изображения коэффициентов Генри для NO_2 и N_2O_4 в виде $\lg H = f(T)$.

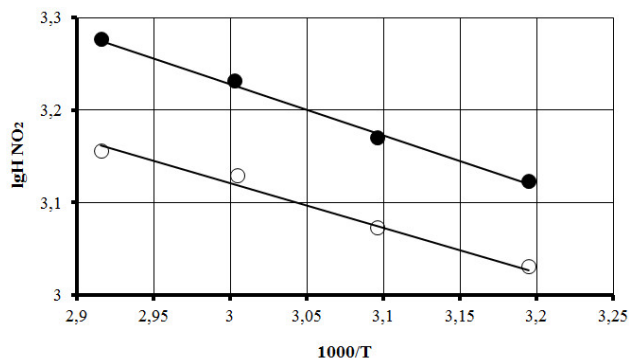


Рис. 4. Зависимость коэффициента Генри от температуры для NO_2 при концентрации HNO_3 (●) 58 и (○) 60 % масс.

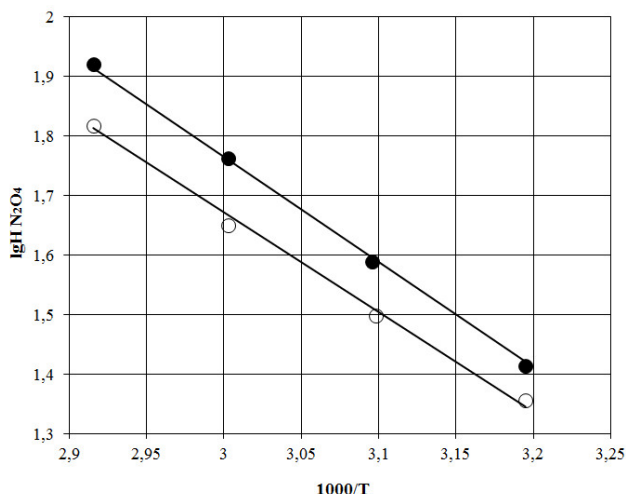


Рис. 5. Зависимость коэффициента Генри от температуры для N_2O_4 при концентрации HNO_3 (●) 58 и (○) 60 % масс.

Авторы [15] приводят значения растворимости N_2O_4 в азотной кислоте 60 % масс при 20 °С в виде соотношения

$$\gamma = \frac{C_{\text{N}_2\text{O}_4}^{\text{ж}}}{C_{\text{N}_2\text{O}_4}^{\text{г}}} = 85.$$

Авторы [16] получили значение $\gamma=140$, а исследователи [9] – $\gamma=66$.

По результатам, полученным в ходе данного исследования, $\gamma=73$.

Равновесные данные позволяют оценить количество воздуха, необходимое для отдувки при производстве 1 т азотной кислоты производственной концентрации (в пересчете на 100 % азотную кислоту) при заданном давлении и температуре процесса отдувки оксидов азота. При ведении процесса отдувки на современных агрегатах производства азотной кислоты в продувочных колонных диаметром 2,2 м и высотой 10,7 м (с четырьмя ситчатыми тарелками, расположенными на расстоянии 0,6 м друг от друга) окислы азота не отдуваются до пределов, установленных техническими условиями (0,007 % масс.). По результатам наших расчетов, в существующей схеме необходимо установить продувочную колонну с шестью ситчатыми тарелками, расположенными на расстоянии 0,6 м друг от друга (общая высота 11,9 м), диаметром 2,2 м при умеренных нагрузках по газу и жидкости.

6. Выводы

В результате анализа равновесия в системе оксиды азота – азотная кислота – вода исследована зависимость парциального давления NO_2 и N_2O_4 от их концентрации в жидкой фазе, концентрации азотной кислоты и температуры. Установлены значения растворимости NO_2 и N_2O_4 в соответствии с законом Генри. Определены зависимости парциальных давлений NO_2 и N_2O_4 от состава жидкой фазы и температуры. Полученные экспериментальные данные позволили формализовать выражения для коэффициентов Генри, что, в свою очередь, позволило определить значения растворимости оксидов азота в жидкой фазе в равновесных условиях (или близких к ним), то есть 58–60 % мас HNO_3 и температурах 40–70 °С.

С помощью полученных зависимостей была рассчитана продувочная колонна, которая должна иметь диаметр 2,2 м, высоту 11,9 м и 6 ситчатых тарелок, расположенных на расстоянии 0,6 м друг от друга для достижения содержания оксидов азота в производственной кислоте на уровне, соответствующем техническим условиям.

Литература

- Товажнянский, Л. Л. Технология зв'язанного азоту [Текст]: підручник / Л. Л. Товажнянский, О. Я. Лобойко та ін.; за ред. О. Я. Лобойка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 536 с.
- Барский, В. А. Укрінформ В Украине 50 млн га земли, пригодной к использованию [Электронный ресурс] / В. А. Барский. – 2012. – Режим доступа: http://www.ukrinform.ua/rus/news/v_ukraine_50 mln_ga_zemli_prigodnoy_k_ispolzovaniiyu_ucheniy_1420332
- Процессы и аппараты химической технологии [Текст]: в 2-х ч. Ч. 2. / под ред. Л. Л. Товажнянского. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 628 с.
- Кутепов, А. М. Общая химическая технология [Текст]: учебник / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен; 3-е изд., перераб. – Москва: Академкнига, 2004. – 528 с.
- Письменный, Б. В. Сравнительная оценка и поиск новых эффективных технологических схем очистки газовоздушных выбросов от оксидов азота (NO_x) [Текст] / Б. В. Письменный, Л. П. Кравченко, А. В. Деримова, О. В. Кожура // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 6. – С. 173–176.
- Kuporka, J. Removal of nitrogen oxides from flue gases in a packed column [Text] / Kuporka J. // Environment Protection Engineering. – 2011. – Vol. 37, Issue 1. – P. 13–22.

7. Chacuk, A. Intensification of nitrous acid oxidation [Text] / A. Chacuk, M. Wilk, S. Ledakowicz // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, Issue 24. – P. 7446–7453. doi: 10.1016/j.ces.2007.08.023
8. de Paiva, J. L. Absorption of nitrogen oxides in aqueous solutions in a structured packing pilot column [Text] / J. L. de Paiva, G. C. Kachan // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Vol. 43, Issue 7. – P. 941–948. doi: 10.1016/j.cep.2003.08.005
9. Поторжинская, С. С. Исследование равновесия в системе азотная кислота – вода – окислы азота при содержании до 1,5 % N_2O_4 [Текст] / С. С. Поторжинская, Н. Г. Рунова, И. Г. Тертышный и др. // Труды НИИ ТЭХИМ. – 1982. – Вып. 1. – С. 1–5.
10. Соловьев, Н. Н. Диссоциация N_2O_4 в неводных растворителях [Текст] / Н. Н. Соловьев, В. П. Панов, Л. Я. Терещенко и др. // Журнал прикладной химии. – 1979. – Т. 52, № 10. – С. 2324–2326.
11. Hamil, H. F. Collaborative Study of Method for the Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources (Nitric Acid Plants) [Text] / H. F. Hamil, R. E. Thomas. – Southwest Research Institute Report for Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC, 1974. – 40 p.
12. Терещенко, Л. Я. К вопросу о расчете условий равновесия и процессов взаимодействия окислов азота с растворами азотной кислоты [Текст] / Л. Я. Терещенко, В. П. Панов, М. Е. Позин // Журнал прикладной химии. – 1972. – Т. 45, № 1. – С. 189–192.
13. Терещенко, Л. Я. Равновесие оксидов азота с растворами азотной кислоты [Текст] / Л. Я. Терещенко, М. И. Куча, В. П. Панов, В. В. Зубов // Журнал прикладной химии. – 1979. – Т. 52, № 3. – С. 1743–1747.
14. Chambers, F. S. Absorption of Nitrogen dioxide by aqueous solutions [Text] / F. S. Chambers, T. K. Sherwood // Industrial and Engineering Chemistry. – 1937. – Vol. 29, Issue 12. – P. 1415–1422. doi: 10.1021/ie50336a022
15. Lefers, J. B. The oxidation and absorption of nitrogen oxides in nitric acid in relation of the tail gas problem of nitric acid plants [Text] / J. B. Lefers, F. C. de Boks, C. M. van den Bleek, P. J. van den Berg // Chemical Engineering Science. – 1980. – Vol. 35, Issue 1-2. – P. 145–153. doi: 10.1016/0009-2509(80)80081-9
16. Караваев, М. М. Равновесие при образовании азотной кислоты в газовой фазе [Текст] / М. М. Караваев, И. Г. Скворцов // Журнал физической химии. – 1962. – Т. 35, № 5. – С. 1072–1074.
17. Klemenc, A. Zur Kenntnis der Salpetersäure. Methoden zur Gasanalyse im System N_2 – NO – NO_2 – N_2O_4 – N_2O_3 – HNO_2 – HNO_3 [Text] / A. Klemenc // Monatshefte f. Chemie. – 1952. – Vol. 83, Issue 2. – P. 334–345. doi: 10.1007/bf00938559
18. Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности [Текст] / под ред. В. М. Олевского. – Москва: Химия, 1985. – 400 с.
19. Зимон, А. Д. Физическая химия [Текст]: учебник / А. Д. Зимон. – Москва: «Агар», 2003. – 320 с.
20. Атрощенко, В. И. Курс технологии связанного азота [Текст] / В. И. Атрощенко, А. М. Алексеев, А. П. Засорин и др.; под ред. В. И. Атрощенко. – Москва: Химия, 1968. – 384 с.
21. Bodenstein, M. Bildung und Zerlegung von stickoxid [Text] / M. Bodenstein // Zeitschrift f r Physikalische Chemie. – 1922. – Vol. 100. – P. 63–72.
22. Кислота азотная неконцентрированная ТУ:ТУУ 24.1–33968601–001:2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://hyndyv.com.ua/ru/pr_kislota_azot_nekonzentrir.html
23. Интенсификация процесса получения неконцентрированной азотной кислоты на Невинномысском ПО «Азот»: отчет о НИР (заключительный) [Текст]. – ХПИ – №01.87.0033109. – Харьков, 1987. – 35 с.
24. Разработка оптимальных условий получения азотной кислоты различной концентрации под давлением 20–25 атм. Интенсификация процесса получения неконцентрированной азотной кислоты на НПО «Азот»: отчет о НИР (заключительный) [Текст]. – ХПИ – №01.82.0088599. – Харьков, 1983. – 48 с.
25. Skalska, K. Kinetic model of NO_x ozonation and its experimental verification [Text] / K. Skalska, J.S. Miller, S. Ledakowicz // Chemical Engineering Science. – 2011. – Vol. 66, Issue 14. – P. 3386–3391. doi: 10.1016/j.ces.2011.01.028
26. Janiczek, W. A simplified model of the absorptive-regenerative process in the technology of nitric acid production [Text] / W. Janiczek // Technical Transactions. Chemistry. – 2014. – Vol. 1. – P. 15–33.
27. Васильев, В. П. Аналитическая химия: в 2 ч. Ч. 1. Гравиметрический и титриметрический методы анализа [Текст] / В. П. Васильев. – Москва: Высшая школа, 1989. – 320 с.